Journal of Industrial Innovations 3(3) (2025) 104 – 127

Industrial Innovations

https://jii.araku.ac.ir

ISSN: 3092-7811

Integrating Production Scheduling, Maintenance Planning and Quality Control with Sequence-dependent Setup Times, Controllable Processing Times and Outsourcing the Part of Production

Mahdi Yousefi Nejad Attari [a*], Elham Saghafi [b], Leila Rostamian [c]

[a] Department of Industrial Engineering, Bon.C., Islamic Azad University, Bonab, Iran.
[b] Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
[c] Department of Industrial Engineering, Qaz.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Yousefi Nejad Attari M, Saghafi E, Rostamian L. Integrating Production Scheduling, Maintenance Planning and Quality Control with Sequence-dependent Setup Times, Controllable Processing Times and Outsourcing the Part of Production. Industrial Innovations. 2025;3 (3):104-127.

https://doi.org/10.61882/jii.3.3.104

KEYWORDS

Integrated scheduling;
Maintenance planning;
Quality control;
Sequence-dependent setup time;
Controllable processing time;
multi-objective optimization.

ABSTRACT

Since production systems constantly need to prevent efficiency decline, and one of the main components of maintaining efficiency is the proper implementation of the quality control system. Therefore, in production systems, it is essential to integrate production scheduling, maintenance and repair planning, and quality control. In this research, an attempt has been made to present processing times in an integrated system by presenting an advanced model of single-machine production scheduling with sequence-dependent setup times. This model has been modeled with two objectives: achieving uniform production or minimizing the difference between the maximum and minimum production of a specific product in a production period, and minimizing the total costs involved in the production process, including setup costs, product production, shortages, inventory, inspection of manufactured items, and maintenance costs (including preventive maintenance and major repairs). The results of implementing the model in a case study showed that, first, there is a completely direct relationship between the volume of manufactured items for each product in each period and the number of non-conforming items in each period. Second, planning for preventive maintenance and repairs is less expensive than major repairs. Also, the number of non-conforming items in each period for each product in different periods is affected by the timing of production and maintenance and repairs of products. So that the production manager should pay attention to the processing times in planning the production of these products.

Extended Abstract

1. Introduction

Production systems operate in highly competitive environments where maintaining operational efficiency is essential for survival and growth. However, efficiency tends to decline over time due to equipment deterioration, process variability, quality degradation, and improper coordination between operational functions. One of the most important mechanisms for preventing performance decline is the effective implementation of a comprehensive quality control system. At the same time, maintenance and repair activities play a critical role in sustaining system reliability and preventing unexpected breakdowns.

Traditionally, production scheduling, maintenance planning, and quality control have been addressed separately.

* Corresponding author.
E-mail address: mahdi108108@iau.ir
DOI: https://doi.org/10.61882/jii.3.3.104
Received: November 6, 2025; Received in revised form: January 6, 2026; Accepted: February 16, 2025.
Article type: Research Paper

Nevertheless, real-world manufacturing environments reveal strong interdependencies among these functions. Production timing affects equipment condition; maintenance activities influence processing times and system availability; and quality performance is directly impacted by both production intensity and machine health. Therefore, an integrated approach is necessary to ensure cost efficiency, production stability, and quality improvement.

2. Statement of the Problem

In many manufacturing systems, particularly single-machine environments with sequence-dependent setup times, decision-making becomes complex due to the interaction between scheduling, maintenance, and quality considerations. Ignoring these interactions may lead to increased costs, production imbalance, excessive defects, and higher corrective repair expenses.

The primary challenge addressed in this research is how to simultaneously determine production scheduling, maintenance and repair planning, and quality-related decisions within a unified framework. Specifically, the study focuses on incorporating processing times into an integrated model where setup times depend on job sequences and machine condition evolves over time.

The objectives of the proposed model are twofold. The first objective is to achieve production uniformity by minimizing the difference between the maximum and minimum production quantities of a specific product within the planning horizon. Balanced production reduces instability in inventory levels and customer dissatisfaction. The second objective is to minimize the total production cost, including setup costs, production costs, shortage penalties, inventory holding costs, inspection costs for manufactured items, and maintenance costs (both preventive maintenance and major corrective repairs).

3. Methodology

This research develops an advanced mathematical model for single-machine production scheduling with sequence-dependent setup times under an integrated framework. The model simultaneously considers production decisions, preventive maintenance scheduling, corrective repair planning, and inspection policies.

Processing times are modeled in a way that reflects their interaction with maintenance activities and quality performance. The system performance deteriorates over time, which affects both production efficiency and the generation of non-conforming items. Preventive maintenance actions restore machine condition partially or fully, while major repairs involve higher costs and longer downtime.

The model is formulated as a bi-objective optimization problem. The first objective function minimizes production imbalance, and the second minimizes the total system cost. A case study was conducted to evaluate the applicability and effectiveness of the proposed model. Realistic production, cost, and maintenance parameters were incorporated to analyze system behavior under different planning scenarios.

4. Results

The results obtained from implementing the model in the case study reveal several important findings.

First, there is a direct and positive relationship between the production volume of each product in each period and the number of non-conforming items generated during that period. As production quantity increases, the number of defective items also increases proportionally, highlighting the importance of integrating quality considerations into production planning.

Second, the analysis demonstrates that preventive maintenance and minor repair planning are significantly less costly than major corrective repairs. Systems that rely heavily on corrective maintenance experience higher total costs due to longer downtime and increased defect rates.

Third, the number of non-conforming items for each product across different periods is strongly influenced by the timing of production and maintenance activities. The interaction between processing times and maintenance schedules directly affects machine condition and, consequently, product quality. This confirms that maintenance timing decisions must be aligned with production scheduling decisions.

5. Conclusion

This study presented an integrated bi-objective model for single-machine production scheduling with sequence-dependent setup times, incorporating maintenance planning and quality control considerations. By simultaneously optimizing production uniformity and total system cost, the proposed model provides a comprehensive decision-support framework for manufacturing managers.

The findings emphasize that production volume, maintenance strategy, and processing times are interdependent factors influencing defect generation and overall cost. Preventive maintenance planning proves to be more economical than reliance on major repairs, and improper coordination between production and maintenance increases the number of non-conforming items.

Therefore, production managers should carefully consider processing times and maintenance scheduling when planning production activities. The integrated approach proposed in this research contributes to improved production balance, reduced costs, enhanced quality performance, and sustainable operational efficiency.

نوآوری‌های صنعتی، دوره ۳، شماره ۳، سال ۱۴۰۴، صفحات ۱۰۴ تا ۱۲۷

نوآوری‌های صنعتی

شاپا: ۷۸۱۱-۳۰۹۲

یکپارچه‌سازی زمان‌بندی تولید، برنامه‌ریزی نگهداری تعمیرات و کنترل کیفیت با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و زمان‌های پردازش قابل‌کنترل

مهدی یوسفی‌نژاد عطاری[الف*]، الهام ثقفی[ب]، لیلی رستمیان[ج]

[الف] گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران. mahdi108108@iau.ir

[ب] گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. Elhamsaghafi47@yahoo.com

[ج] گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. Leila.rostamian314@gmail.com

واژگان کلیدی

زمان‌بندی تولید؛ برنامه‌ریزی نگهداری تعمیرات؛ بازرسی اقلام تولیدی؛ زمان‌بندی تولید تک‌ماشینی؛ زمان‌های آماده‌سازیِ وابسته به توالی؛ زمان‌های پردازش قابل‌کنترل.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

چکیده

ازآنجایی‌که سیستم‌های تولیدی مدام نیاز به جلوگیری کاهش بازدهی دارند، و یکی از مولفه‌های اصلی حفظ راندمان اجرای مناسب سیستم کنترل کیفیت است. لذا در سیستم‌های تولید یکپارچه‌سازی زمان‌بندی تولید، برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات و کنترل کیفیت ضروری است در این تحقیق سعی شده است با ارائه یک مدل توسعه‌یافته زمان‌بندی تولید تک‌ماشینی با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی، زمان‌های پردازش در یک سیستم یکپارچه ارائه گردد. این مدل با دو هدف؛ دست‌یابی به تولیدی یکنواخت یا کمینه‌سازی تفاوت میان بیشینه و کمینه تولید محصول خاص در یک دوره تولیدی و کمینه کردن کل هزینه‌های درگیر در فرایند تولید اعم از هزینه راه‌اندازی، تولید محصول، کمبود، موجودی، بازرسی اقلام تولیدی و هزینه‌های نت (شامل نت پیش‌گیرانه و تعمیرات اساسی) مدلسازی شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل در یک مطالعه موردی نشان داد اولاً رابطه کاملاً مستقیمی بین حجم اقلام تولیدی برای هر محصول در هر دوره با تعداد اقلام نامنطبق هر دوره وجود دارد. ثانیاً برنامه‌ریزی برای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه هزینه کمتری نسبت به تعمیرات اساسی دارد. همچنین تعداد اقلام نامنطبق هر دوره برای هر محصول در دوره‌های مختلف متأثر از زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات محصولات است. به طوری که مدیر تولید باید در برنامه‌ریزی تولید این محصولات با توجه به زمان‌های قابل‌پردازش توجه داشته باشند.

۱- مقدمه

سامانه‌های تولیدی، در یک نظامِ واقعیِ تولید، همیشه در معرض زوال درگذر زمان هستند. زوال این سامانه‌ها از یک‌سو سبب افزایش نرخ شکست و کاهش میزان دسترسی می‌شود؛ از سویی دیگر با افزایش ضریب نقص، بر کیفیت محصولات تولیدی اثر می‌گذارد. خوشبختانه، یک‌رویه نت منظم قادر به کاهش یا رفع فرسودگی نظامِ تولیدی و بهبود کیفیت محصول است. در واقع، زمان‌بندیِ تولید، برنامه‌ریزی نت و کنترل کیفیت می‌توان به‌عنوان کارکردهای کلیدی شرکت‌ها در راستای دست‌یابی به کیفیت بالا و تولید کارآمد در بازار رقابتی بیان نمود. به‌طور سنتی، این سه تابع به‌عنوان مسائلی جداگانه مدل‌سازی و بهینه‌سازی شده‌اند؛

* نویسنده مسئول؛

آدرس پست الکترونیک: mahdi108108@iau.ir

درحالی‌که، شواهد زیادی در ادبیات نشان داده شده است که ادغام این توابع به دلیل وابستگی متقابل آنها بسیار مقرون‌به‌صرفه‌تر است.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده، نیاز به یک روش و الگوی جدید که هم‌زمان برنامه‌ریزیِ تولید، نت و کیفیت را با هم در نظر بگیرد، محسوس است؛ به‌گونه‌ای که بتوان جواب‌هایی اتخاذ نمود که میان سه مؤلفه کلیدی برای کیفیت و تولید بهتر، توافق ایجاد کنند. این جواب‌ها، که بهترین اندازه تولید، آستانه‌های نت و کنترل کیفیت را در کنار یکدیگر دربردارد، تصمیم‌گیرنده را قادر می‌سازد که هزینه کل در واحد زمان را کمینه‌کند.

هدف از این پژوهش ارائه ابزارهایی است که مسئله زمان‌بندی تولید با فرض وابستگی زمان‌های آماده‌سازی به‌توالی، زمان‌های پردازش قابل‌کنترل و ضرورت فعالیت‌های نت و بازرسی‌های کیفی برای دست‌یابی به سطحی بالا از تولید باکیفیت و عدم احتمال خرابی تجهیزات، مورد بررسی قرار دهد. زمان‌های پردازش قابل نظارت به این معنا است که با صرف هزینه بیش‌تر، می‌توان زمان پردازش هر محصول را کاهش داد. زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی بیان‌گر آن است که زمان آماده‌سازی هر محصول هم به کار موردنظر و هم به فعالیت پیش از آن بستگی دارد. بنابراین، این پژوهش در راستای تحققِ موارد زیر است:

دست‌یابی به برنامه تولید یکنواخت (کاهش تفاوت بیش‌ترین و کم‌ترین تولید به ازای هر محصول)، هم‌زمان با کمینه‌سازی کل هزینه‌ها از جمله هزینه راه‌اندازی، تولید محصول، کمبود، کنترل موجودی، بازرسی کیفیت و نت (شامل هزینه نت پیش‌گیرانه، تعمیرات اساسی و تعمیرات جزئی).

علاوه بر این موضوع که یکپارچه‌سازی زمان‌بندی سیستم‌های تولید و نگهداری و تعمیرات جهت حصول تولید پایدار ضروری است، باید نوع سیستم نگهداری و تعمیرات نیز انتخاب شود. چرا که در همه حالات و شرایط نگهداری و تعمیرات اضطراری یا پیشگرانه و حتی پیشگویانه نمی‌تواند انتخاب گزینه بهینه‌ای محسوب شود. لذا در این تحقیق یکی از ضرورت‌های دیگر، انتخاب نوع سیستم نگهداری و تعمیرات است.

رویه حصول موارد مزبور بدین‌صورت است که پس از تولید به‌اندازه مقیاس، نت پیش‌گیرانه و بازرسی کیفی به ترتیب برای کاهش زوال سامانه تولیدی و اصلاحِ اقلامِ ناسازگار در کالاهای نهایی و زمانی که تعداد تجمعی اقلام ناسازگار از یک آستانه مفروض فراتر می-روند، یک تعمیر اساسی برای تجدید سامانه تولیدی انجام می‌شود. بنابراین، مدل یکپارچه برای بهینه‌سازی برنامه تولید و نت با رویکرد تعمیرات اساسی با هدف کمینه‌سازیِ هزینه- در عین برآوردن تمام خواسته‌های محصول- ایجاد شده‌است.

در ادامه این تحقیق ادبیات موضوعی در زمینه یکپارچه‌سازی سیستم‌های تولید و نگهداری و تعمیرات ارائه‌شده است. در بخش سوم مدل ریاضی مرتبط با اهداف تحقیق بیان شده است و در بخش چهارم به پیاده‌سازی مدل و در بخش آخر به نتایج و پیشنهادات مدیریتی اشاره شده است.

۲- ادبیات موضوعی

در ادامه، به برخی از پژوهش‌های پیشین در حوزه زمان‌بندیِ تولید بر اساس فرضیات مسئله موردنظر در این پژوهش، ارائه می‌گردد.

مونما و پاتس[1] [۱] نخستین پژوهش را در زمان‌بندی تولید انجام دادند. در این پژوهش، زمان‌بندی تولیدِ تک‌هدفه با تعداد اقلام گوناگون با فرض زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی برای افق برنامه‌ریزی محدود بررسی‌شده‌است؛ ولی فرضیات زمان‌های پردازش قابل‌کنترل و اقلام فاسدشدنی در نظر گرفته نشده بود. دو نوع روش ابتکاری برای حل این مسئله استفاده شده است.

کریمی‌نسب و آریانژاد [۲] یک روش فراابتکاری برای حل مسئله زمان‌بندی تولید چندهدفه با تعداد اقلام گوناگون با زمان‌های

[1] Monma and Potts

آماده‌سازیِ ناوابسته از توالی و زمان‌های پردازش قابل‌کنترل بدون فرضِ فسادپذیری اقلام توسعه دادند.

۲-۱- زمان‌های پردازش قابل‌کنترل[1]

رویه متداول در نخستین مسائل زمان‌بندیِ قطعی این است که زمان‌های پردازش فعالیت‌ها، مقادیر ثابتی باشند؛ ولی در بسیاری از موارد واقعی، زمان‌های پردازش با تخصیص منابع اضافی (منابع گسسته یا پیوسته) به فعالیت‌ها، قابل‌کنترل هستند. در این موارد، زمان‌های پردازش متغیرهای تصمیمی هستند که توسط مدیر تعیین می‌شود و از این انعطاف‌پذیری می‌توان برای بهبود عملکرد سامانه تولیدی استفاده کرد.

جذابیت مسائل زمان‌بندی با زمان‌های پردازش قابل‌کنترل از هردو دیدگاه نظری و عملی، توجه بسیاری از محققان را در طی ۲۵ سال اخیر به خود جلب شده‌است که در این پژوهش نیز مفروض است.

ونگ و شا[2] [۳]، مسئله زمان‌بندی تک‌ماشین با زمان‌های پردازش قابل‌کنترل را مطرح کرده‌اند. هدف این پژوهش کاهش هزینه کل بوده‌است. مسئله به‌عنوان مسئله تخصیص مدل‌سازی شده و از الگوریتمی با پیچیدگی O(nlogn) برای حل مسئله استفاده شده‌است.

کیوان‌فر و همکاران [۴]، مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیرمرتبط با زمان‌های پردازش قابل‌کنترل را مطرح کردند. هدف آن‌ها در این پژوهش، کمینه‌سازیِ همزمان زودکرد و دیرکرد و همچنین کل زمان تکمیل بوده‌است. برای حل مسئله از یک روش ابتکاری پیشنهادی، دو روش فراابتکاری و یک شیوه ترکیبی استفاده کرده‌اند. نتایج محاسباتی نشان‌می‌دهد که روش ترکیبی نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌کند.

هیه[3] و همکاران [۵]، مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازیِ غیرمرتبط با وجود زمان‌های پردازش قابل‌کنترل را مطرح کردند. هدف از این پژوهش، کاهشِ هزینه کل در نظرگرفته شده‌است. آن‌ها در این پژوهش یک روش برنامه‌ریزی یکپارچه و یک روش ابتکاری برای حل مسئله ارائه کرده‌اند.

کریمی‌نسب و همکاران [۶]، یک مدل ریاضی یکپارچه برای مسئله تعیین انباشته و مسئله زمان‌بندی در محیط کارگاهی تحت مجموعه‌ای از شرایط عملیاتی واقعی ارائه کرده‌اند. یکی از فرضیات مطرح‌شده در این پژوهش قابلیت کنترل زمان‌های پردازش فعالیت‌ها است. به دلیل *Np-hard* بودن مسئله، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[4] برای حل آن استفاده شده‌است. الگوریتم پیشنهادشده در مورد مشخصه‌ها یا مقادیر ثابت، زمان توقف فرایند جستجو، همگرایی/ تنوع‌بخشی، خودکنترل است.

۲-۲- زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی[5]

مدت‌ها فعالیت آماده‌سازی- هم از بُعد زمان و هم هزینه- ناچیز یا قابل‌اغماض فرض می‌شد و یا این‌که آن را به‌عنوان بخشی از زمان پردازش در نظر می‌گرفتند. درحالی‌که این روش ممکن است در برخی مسائل زمان‌بندی به‌کار رود، در برخی موارد نیز زمان آماده‌سازی به‌صورت جداگانه درنظرگرفته‌می‌شود.

در مسائل با زمان‌های آماده‌سازی دو حالت وجود دارد: زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی و زمان‌های آماده‌سازی ناوابسته (مستقل) از توالی. در حالت نخست، آماده‌سازی، تنها به فعالیتی که پردازش می‌شود بستگی دارد؛ ولی در حالت دوم، آماده‌سازی- علاوه بر فعالیتِ تحت پردازش- به فعالیت بلافاصله پیش از آن نیز بستگی دارد.

در پژوهش‌های انجام‌شده از مدیران محیط‌های صنعتی، حدود سه‌چهارم آن‌ها معتقدند که برخی از عملیات‌ها نیازمند زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی می‌باشند، درحالی‌که ۱۵٪ آن‌ها گـــزارش کرده‌اند که تمامی عملیات‌ها به زمان‌های

[1] Controllable Processing Time
[2] Wang and Xia
[3] Ping
[4] Particle Swarm Optimization (PSO)
[5] Sequence dependent Set-up Times

آماده‌سازی وابسته به‌توالی نیاز دارند. همچنین، برخی تحقیقات نتایجی مبنی بر اهمیت درنظرگیری زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی در مدیریت مؤثر ظرفیت محیط‌های صنعتی، ارائه می‌دهد. به‌طور مثال، در صنعت چاپ می‌توان کاربرد زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی را مشاهده نمود؛ بدین ترتیب که تمیزکاری ماشین‌ها بستگی به رنگ جاری و رنگ سفارش بعدی دارد. در صنعت ساخت ظروف، تغییر مدت‌زمان آماده‌سازی بستگی به‌اندازه و شکل ظروف دارد. زمان آماده‌سازی در فرایند تراش‌کاری خودکار وابسته به تعداد و نوع ابزار نصب‌شده بر روی برجک متحرک و قطعات موردنیاز در مراحل بَعدی فعالیت‌ها است. همچنین در صنایع شیمیایی، دارویی، غذایی، فلزی و کاغذی می‌توان زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی را مشاهده نمود.

تحقیقاتی که در این زمینه تاکنون انجام‌شده به شرح زیر است:

کریمی‌نسب و فاطمی‌قمی [۷] مسئله زمان‌بندیِ تولید تک‌مرحله‌ایِ چندهدفه با زمان‌های پردازش قابل‌کنترل و زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی برای اقلام فاسدشدنی را ارائه کردند و برای حل آن از یک روش ابتکاری پیشنهادی و فراابتکاری چندهدفه کمک گرفتند.

کیانگ[1] و همکاران [۸] یک مسئله زمان‌بندی تک‌ماشینی را در نظرگرفتند و مدل جدیدی را معرفی کرده‌اند که زمان‌های پردازش واقعی فعالیت‌ها نه‌تنها به زمان شروع کارها بلکه به موقعیت برنامه‌ریزی‌شده آن‌ها نیز وابسته است. هدف در این پژوهش، یافتن زمان‌بندی بهینه است که زمان تکمیل کل برنامه را کمینه سازد.

۲-۳-تلفیق برنامه‌ریزی نت و زمان‌بندی تولید

امکان دسترسی همیشگی به ماشین یکی از فرضیات رایج در شمار قابل‌توجهی از تحقیقات موجود در زمینه زمان‌بندی تولید است. این فرضِ ساده‌ساز- که برای سهولت در محاسبات زمان‌بندی مورداستفاده قرار می‌گیرد- برخلاف دنیای واقعی است. در دنیای واقعی ماشین‌آلات به دلایل مختلف ازجمله خرابی‌هایِ پیش‌بینی‌نشده و فعالیت‌های نت، در زمان‌هایی در دسترس نمی‌باشند و زمان‌بندی برای ماشین‌آلات غیرقابل‌دسترس بی‌معنا است و پیاده‌سازی آن در واقعیت امکان‌پذیر نخواهد بود. چنان‌چه تجهیزات بنا به دلایلی در دسترس نباشند، ادامه فرایندی که در پیش از وقفه در حال اجرابوده‌است می‌تواند به سه حالت متفاوت زیر تعریف گردد:

- ادامه‌پذیر جزئی: در این حالت چنان‌چه فرایند انجام یک کار پیش از توقفِ دستگاه به‌طور کامل تکمیل‌نشده‌باشد، ازسرگیری فرایند از نقطه توقف، نیازمند انجام مجموعه‌ای تنظیمات دوباره است.
- ادامه‌پذیر: در این حالت چنان‌چه فرایند انجام فعالیت پیش از توقف دستگاه به طورکامل تکمیل‌نشده‌باشد، این فرایند می‌تواند از نقطه توقف از سرگرفته شود.
- ادامه‌ناپذیر: در این حالت چنان‌چه فرایند انجام فعالیت پیش از توقف دستگاه به طورکامل تکمیل‌نشده‌باشد، این فرایند بایستی از ابتدا و به‌طور کامل انجام شود.

در این پژوهش فرض بر این است که کلیه فعالیت‌ها ادامه‌ناپذیر هستند.

در ادامه، مروری بر زمان‌بندی تولید همراه با زمان‌بندی نت پیش‌گیرانه خواهیم‌داشت.

نادری و همکاران [۹] مدلی یکپارچه برای زمان‌بندی تولید جریان کارگاهی مختلط با زمان‌های آماده‌سازیِ وابسته به‌توالی و زمان‌بندی نت ارائه داده و برای حل آن سه رویه حل ابتکاری و دو رویه حل فراابتکاری توسعه‌داده‌اند.

سراکول[2] و همکاران [۱۰] الگوریتم ژنتیک را به‌منظور حل مدل ریاضی برنامه‌ریزی نت و زمان‌بندی تولید به‌طور همزمان- پیشنهادشده توسط کاسادی و کوتانوغلو- مورد استفاده قرار دادند.

[1] Yuanjiang
[2] Sortrakul

چن[1] [۱۱] دو روش بهینه‌سازی و یک‌رویه حل ابتکاری را به‌منظور زمان‌بندی یک ماشین با فعالیت‌های نت در بازه‌های زمانی متناوب و فعالیت‌های نت در زمان‌های متغیر به‌منظور کاهش کل زمان تولید با فرض ادامه‌ناپذیری فعالیت‌ها بعد از وقفه در فرایند انجام، مورد بررسی‌قراردادند.

پان[2] و همکاران [۱۲] به‌منظور یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی نت و زمان‌بندی تولید به ارائه مدل ریاضی برای تک‌ماشین پرداخته‌اند. هدف موردنظر در این پژوهش، کمینه‌سازی بیشینه زمان تأخیر بود. با فرض متغیربودن زمان‌های نت و وابسته به میزان خرابی ماشین، نتایج محاسباتی بر روی مثال‌های ارائه شده بررسی و کارایی و اثربخشیِ مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های دیگر ثابت شد.

ملولی[3] و همکاران [۱۳] مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی را به همراه برنامه‌ریزی نت در بازه زمانی متناوب و با هدف کاهش کل زمان تولید مورد بررسی‌قراردادند. آن‌ها علاوه بر چندین روش فراابتکاری برای حل مسئله موردنظر سه روش برنامه‌ریزی پویا، شاخه و حد و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را نیز استفاده و نتایج آن‌ها را با یکدیگر مقایسه‌کردند.

متقدی‌لاریجانی و همکاران [۱۴] مسئله زمان‌بندی تک‌ماشینی با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی برای کمینه‌سازی هزینه کل زودکرد و دیرکرد برای تمام فعالیت‌ها و هزینه‌های مربوط به پردازش ماشین و فعالیت‌های نت را مطالعه کردند. ازآنجاکه مسئله مربوطه جزء کلاس Np-hard بود، از یک روش فراابتکاری برای دست‌یابی به جواب بهینه استفاده کرده‌اند.

وانگ[4] [۱۵] مسئله بهینه‌سازیِ دو هدفه یکپارچه برای زمان‌بندی تولید و نت پیش‌گیرانه را با درنظرگیری یک ماشین و زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی بررسی می‌کند؛ دو هدف به شرح زیر است:

کمینه‌سازی زمان تکمیل مورد انتظار فعالیت‌ها و بیشینه زمان موردانتظار شکست ماشین به‌طور هم‌زمان. برای حل این مسئله یکپارچه دو روش ژنتیک تکاملی به‌کاربرده شده است.

ونگ[5] و همکاران [۱۶] یک روش زمان‌بندی یکپارچه برای مسئله زمان‌بندی تولید و نت با فرض منابع و فعالیت‌های نت متفاوت ارائه‌دادند و نتیجه‌گرفتند که روش پیشنهادی در این پژوهش زمان تکمیل کل برنامه را در مسائل زمان‌بندی کاهش‌می‌دهد.

لی[6] [۱۷] مسئله زمان‌بندی تک‌ماشینی با اقلام فاسدشدنی را در محیط واقعی در نظرگرفتند؛ درحالی‌که، ماشین‌ها همیشه دردسترس نیستند. هدفِ مسئله، کمینه‌کردن کل زمان تکمیلِ برنامه بود. به دلیل *NP-hard* بودن مسئله از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح صفر و یک برای حل مدل استفاده کرده‌است.

پان[7] و همکاران [۱۸] یک مدل زمان‌بندی گروهی تک‌ماشینی و یکپارچه پیشنهاد دادند که شامل اثرات یادگیری و فراموشی و برنامه‌ریزی نتِ پیش‌گیرانه بود. هدف پژوهش، کمینه‌کردن زمان تکمیل کل برنامه بود. این مدل به‌طور همزمان شامل زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی، زمان‌های پردازش واقعی، زمان نت برنامه‌ریزی‌شده و زمان تعمیر است و برای حل این مدل، یک الگوریتم جستجو توسعه داده‌اند.

رستگار و همکاران [۱۹] یک مدل ریاضی جدید برای تصمیم‌گیری همزمان برنامه‌ریزی نت و زمان‌بندی تولید با هدف کمینه‌کردن مجموع هزینه‌ها، زمان و دیرکرد در محیط جریان کارگاهی ترکیبی ارائه کرده‌اند. دو الگوریتم تکاملی فراابتکاری چندهدفه مبتنی بر الگوریتم جستجوی هماهنگی و روش حل دقیق اپسیلون-محدودیت برای حل مدل پیشنهادی ارائه شده‌است.

[1] Chen
[2] Pan
[3] Mellouli
[4] Wang
[5] Wong
[6] Lee
[7] Pan

حسینی [۲۰] یک مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و نت مورد مطالعه قرار داده‌است. برای این مسئله دو تابع هدف مدنظر می‌باشد: تابع هدف نخست عبارتست از هزینه‌های کل سامانه که همه عوامل هزینه‌ای تولید را شامل می‌شود و تابع هدف دوم نیز میزان نارضایتی مشتریان است که در اثر تأخیر در تأمینِ به‌موقع، تقاضاها افزایش می‌یابد. باتوجه به این‌که این مسئله از نوع NP-*hard* می‌باشد، یک روشِ حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-بازنگری ۲ (*NSGA-II*) ارائه گردیده‌است.

رزقی و رضاییان [۲۱] مسئله زمان‌بندی خط جریان سرهم‌سازی[1] دو مرحله‌ای با درنظرگرفتن اثر استهلاک ماشین‌ها و فعالیت‌های نت را بررسی کرده‌اند. برای مسئله مورد نظر ابتدا یک مدل ریاضی عدد صحیح ارائه و حل یک نمونه کوچک عملکرد آن نمایش داده شده‌است؛ سپس، تحلیل حساسیت‌های مختلف برای آن ارائه شده است.

حاجی‌پور و موسوی [۲۲] به برنامه‌ریزی تولید و نت به‌طور همزمان می‌پردازند. افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آسیب به محیط‌زیست از جمله دغدغه‌های این پژوهش است و سعی شده‌است تا میزان آلاینده‌های ورودی به صنایع کاهش یابد. برای دست‌یابی به بهینگی با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک و میرایی ارتعاش، بهینه‌سازی خروجی‌ها مشخص و کارایی آن‌ها مقایسه شده‌است.

میشارا و شریواستانا[2] [۲۳] به بهینه‌سازیِ یکپارچه زمان‌بندیِ تولید و برنامه‌ریزی نت در سامانه تک‌ماشینی پرداخته‌اند. هدف، دست‌یابی به‌توالی تولید بهینه، فواصل نت پیش‌گیرانه و گروه‌بندی واحدها است که کل هزینه یکپارچه سامانه در واحد زمان را کمینه‌سازد. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری (*TLBO*) برای بهینه‌سازی تابع هدف استفاده شده‌است. نتایج محاسباتی اثربخشیِ رویکرد پیشنهادی را نشان می‌دهد.

یانگ[3] و همکاران [۲۴]، مسئله بهینه‌سازی یکپارچه برای برنامه‌ریزی تولید برای سامانه‌های تولید تک‌ماشینی چندحالتی که احتمال شکست وجود دارد را بررسی کرده‌اند و الگوریتم یادگیری برای حل این مسئله معرفی شده‌است. نتایج شبیه‌سازی و تجزیه‌وتحلیل، اثربخشی رویکرد پیشنهادی برای حل مسائل یکپارچه را نشان می‌دهد.

مرقم[4] و همکاران [۲۵] به مسئله برنامه‌ریزی تولید و نت یکپارچه با کیفیت‌های مختلف محصولات برگشتی و فرصت‌های برون‌سپاری تولید پرداخته‌اند. در این پژوهش، خط‌مشی (سیاست) کنترل یکپارچه مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهاد شده‌است که هدف آن تعیین برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نت در بافتی ترکیبی تولید-تولید مجدد با گزینه‌های برون‌سپاری است. راهبرد پیشنهادی هزینه کل سامانه را، در یک افق برنامه‌ریزی محدود، به کم‌ترین مقدار کاهش می‌دهد.

چکوبی[5] و همکاران [۲۶] مسئله برنامه‌ریزیِ تولید و نت یکپارچه با ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه کرده‌اند. این پژوهش، شامل توسعه مدلی تحلیلی جدید است که توالی بهینه تولید و نت را تعیین می‌کند که هزینه‌های جریمه زودکرد و دیرکرد و همچنین هزینه انتشار مضر (CO_2) را به کم‌ترین میزان می‌رساند.

سینیسترا و کاوالکنت[6] [۲۷] مدلی را توسعه داده‌اند که زمان‌بندی فعالیت‌ها و خط‌مشی بازرسی را برای پردازش n وظیفه یا فعالیت با زمان‌های پردازش متفاوت در یک سامانه تک‌ماشینی، که احتمال شکست وجود دارد را، ادغام می‌کند. مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی برای ایجاد بهترین توالی کارها و بازرسی‌ها پیشنهاد شده‌اند که هزینه کل مورد انتظار، هزینه نت و هزینه تأخیر را کمینه می‌سازد. مطالعات عددی اهمیت ادغام خط‌مشی بازرسی با توالی وظایف یا فعالیت‌ها را نشان می‌دهد.

صلاحی و همکاران [۲۸] مدلی یکپارچه برای برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی نگهداری پیشگیرانه ارائه کردند که در آن عدم‌قطعیت پارامترها و احتمال وقوع اختلال در تجهیزات نیز در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، هدف اصلی کاهش

[1] Montage, Assembly
[2] Mishara and Shrivasthana
[3] Yang
[4] Merghem
[5] Chekoubi
[6] Sinisterra and Cavalcante

هم‌زمان زمان تکمیل وزنی سفارش‌ها و افزایش قابلیت اطمینان سیستم تولید بود. به‌منظور حل مدل پیشنهادی که از نوع چندهدفه و پیچیده (*NP-hard*) محسوب می‌شود، از دو الگوریتم فرابتکاری *NSGA-II* و *MOPSO* استفاده شد. نتایج مقایسه‌ای نشان داد که الگوریتم *NSGA-II* از نظر کیفیت جواب‌ها عملکرد بهتری دارد، درحالی‌که الگوریتم *MOPSO* در زمان محاسبه سریع‌تر عمل می‌کند. یافته‌های این تحقیق اهمیت تلفیق برنامه‌ریزی تولید و نگهداشت پیشگیرانه را در محیط‌های تولیدی نامطمئن و دارای احتمال خرابی تجهیزات برجسته می‌کند.

لو و همکاران [۲۹] مدلی جامع برای بهینه‌سازی مشترک تولید، بازرسی و نگهداری در سامانه‌های تولید هوشمند ارائه کردند. در این پژوهش، محدودیت زمانی در برنامه‌ریزی عملیات تولید و نگهداری به‌صورت صریح در مدل در نظر گرفته شده است تا شرایط واقعی خطوط تولید مدرن با افق زمانی محدود بهتر شبیه‌سازی شود. هدف مدل، بیشینه‌سازی بهره‌وری و قابلیت اطمینان سیستم از طریق تصمیم‌گیری هماهنگ در زمینه‌های تولید، بازرسی کیفیت و تعمیرات پیشگیرانه است. نتایج عددی نشان داد که بهینه‌سازی هم‌زمان این سه عامل می‌تواند هزینه‌های کل را کاهش داده و عملکرد سیستم را در مواجهه با خرابی‌های احتمالی و نوسانات بهره‌وری بهبود دهد.

وانگ و همکاران [۳۰] رویکردی نوین برای زمان‌بندی تولید و نگهداری مبتنی بر کیفیت در سامانه‌های تولید چندماشینه با شرایط عملیاتی متغیر ارائه کردند. در این پژوهش، کیفیت محصول به‌عنوان عاملی پویا و وابسته به وضعیت ماشین‌ها و شرایط عملیاتی در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی با هدف بهینه‌سازی هم‌زمان برنامه‌ریزی تولید و سیاست‌های نگهداری پیشگیرانه، به‌گونه‌ای طراحی‌شده که بتواند تأثیر تغییرات شرایط کاری (مانند دما، بارکاری و سرعت ماشین‌ها) را بر کیفیت و قابلیت اطمینان محصول لحاظ کند. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل عددی نشان داد که در نظر گرفتن کیفیت به‌عنوان محور تصمیم‌گیری، باعث کاهش نرخ خرابی، افزایش پایداری فرآیند و بهبود بهره‌وری کلی سیستم می‌شود.

وی و همکاران [۳۱] مدلی یکپارچه برای برنامه‌ریزی تولید، نگهداری و کنترل کیفیت در سامانه‌های تولیدی پیچیده ارائه کردند که در آن نگهداری ناقص و بازرسی پویا در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، رفتار خرابی تجهیزات و تغییرات کیفیت محصول به‌صورت هم‌زمان مدل‌سازی شده تا بتوان تأثیر تصمیمات نگهداری و بازرسی را بر عملکرد کلی سیستم ارزیابی کرد. مدل پیشنهادی با هدف کاهش هزینه‌های کل سیستم، افزایش قابلیت اطمینان و حفظ کیفیت محصول توسعه‌یافته و از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته برای تعیین سیاست‌های تولید، زمان‌بندی تعمیرات و بازرسی استفاده شده است. نتایج عددی نشان داد که در نظر گرفتن ویژگی‌های واقعی مانند نگهداری ناقص و بازرسی پویا، به‌طور قابل‌توجهی موجب افزایش کارایی، کاهش خرابی‌ها و بهبود سطح کیفیت خروجی در محیط‌های تولید پیچیده می‌شود.

۲-۴- مرور ادبیات تلفیق برنامه‌ریزی نت و زمان‌بندی کنترل کیفیت

جویااردکانی و مخاکزاربفرویی [۳۲] مدلی یکپارچه برای کنترل فرآیند آماری و مدیریت نت- با در نظرگیری هزینه‌های این رویکردها- در شرکت صنایع چوب کیش طراحی کرده‌اند. نتایج بهینه‌سازی در فرآیند مورد مطالعه نشان می‌دهد که طول دوره نت برنامه‌ریزی‌شده نسبت به برنامه موجود باید افزایش یابد و این موضوع می‌تواند ناشی از انجام تعمیرات جبرانی در زمان اعلام هشدار نادرستِ خارج از کنترل‌بودن فرایند باشد.

رسایی و همکاران [۳۳] مدلی یکپارچه برای نت و کنترل فرایند آماری ارائه کرده‌اند. با استفاده از شیوه یا اصول طرح‌های عاملی، تحلیل حساسیت انجام شده‌است و بر اساس یک مدل جداگانه نت، عملکرد مدل یکپارچه مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. سامانه سری مورد نظر از واحدهای یکسان تشکیل شده‌است. سازوکار خرابی برای هر واحد از سامانه از یک توزیع کلیِ پیوسته پیروی می‌کند. نتایج تحلیل‌ها بیان‌گر این موضوع است که مدل یکپارچه سود سامانه را بهبود می‌بخشد.

۲-۵- مرور ادبیات تلفیق زمان‌بندی تولید، برنامه‌ریزی نت و زمان‌بندی کنترل کیفیت

تامب و کولکارن[1] [۳۴] مدلی یکپارچه بین سه عملکرد اصلی سازمان یعنی نت، تولید و کیفیت ارائه کرده‌اند. هدف کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی سامانه یکپارچه نسبت به برنامه‌ریزی غیریکپارچه است. برای بهینه‌سازی از روش‌های فراابتکاریِ شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک استفاده شده‌است. در نهایت، یک تحلیل تجربی از مقادیر متغیرهای مدل برنامه‌ریزی یکپارچه ارائه‌شده و نتایج آن با رویکرد برنامه‌ریزی جداگانه (غیریکپارچه) مقایسه شده‌است.

ون[2] و همکاران [۳۵] مدلی یکپارچه از سه مفهوم را برای فرآیند تولید پیوسته ارائه کرده‌اند؛ سپس، مدلی ریاضی برای یافتن مقادیر تنظیم بهینه پارامترهای تصمیم که هزینه کل مورد انتظار در واحد زمان را به کمینه می‌کند، ارائه شده‌است. مقایسه عددی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی، هزینه را به طور متوسط ۱/۵٪ کاهش داده‌است.

دوفا[3] و همکاران [۳۶] مدلی را توسعه داده‌اند که تصمیمات زمان‌بندی تولید، برنامه‌ریزی نت ماشین‌آلات و کنترل فرآیند را به‌طور هم‌زمان برای یک سامانه تولیدیِ تک ماشینی ادغام و بهینه می‌کند. این مدل یک رویکرد مناسب برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، نت و کیفیت به‌طور مشترک ارائه می‌دهد. نتایج مدل با نتایج بهینه‌سازی هر سامانه به‌طور جداگانه مقایسه شده‌است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته منجر به صرفه‌جویی در گستره ۲/۶۲ تا ۶/۷۸ درصد می‌شود.

پاندی[4] و همکاران [۳۷] مدلی برای بهینه‌سازی مشترک این سه واحد زمان‌بندی تولید، برنامه‌ریزی نت و زمان‌بندی کنترل کیفیت در یک سامانه تولیدی توسعه داده‌اند. در نهایت، عملکرد سامانه با استفاده از رویکرد یکپارچه پیشنهادی با آن‌چه که با در نظر گرفتن زمان‌بندی نت، کیفیت و تولید به‌طور مستقل به دست می‌آید مقایسه شده‌است و منافع اقتصادی قابل‌توجهی در بهینه‌سازی مشترک دیده می‌شود.

هادیان و همکاران [۳۸] مدلی تصادفی برای برنامه‌ریزی مشترک نت، تولید و کنترل کیفیت در سامانه‌های تولیدی توسعه داده‌اند. برای حل این مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده و مدل تلفیقی برای بررسی تأثیر برنامه‌ریزی مشترک این جنبه‌ها بر مدیریت سامانه‌های تولید مقایسه شده‌است.

گمز[5] و همکاران [۳۹] مسئله‌ای برای یکپارچه‌سازی تولید، بازرسی نمونه‌برداری و برنامه‌ریزی نت را در یک سامانه تولیدی با احتمال شکست تجهیزات، مورد مطالعه قرار داده‌اند. یک مدل ریاضی تصادفی از طریق شیوه‌ها و اصول بهینه‌سازی تخصصی برای حل چنین مسئله‌ای باکیفیت محدود توسعه یافته‌است. مثال‌های عددی برای نشان‌دادن سودمندی رویکرد پیشنهادی و مطالعه تعاملات بین راهبردهای کیفیت، تولید و نت ارائه شده‌اند.

لپس[6] [۴۰] مدلی یکپارچه برای بازرسیِ کیفیت، نت پیش‌گیرانه و ذخیره احتیاطی در یک سامانه تولیدی را ارائه داده‌است. این مدل با هدف به کمینه‌سازی کل هزینه مورد انتظار با درنظرگرفتن محدودیت کیفیت خروجی متوسط محصول نهایی، به ریاضی بیان شده‌است. پس‌ازآن، یک آزمایش عددی برای مدل پیشنهادی ارائه شده‌است و نتایج حاکی از آن است که احتمال خطاهای بازرسی نوع I و نوع II تأثیر بسزایی بر تولید بهینه و درصد اقلام بازرسی‌شده دارد.

چنگ و لی[7] [۴۱] مدلی یکپارچه از تولید، کنترل کیفیت و نت پیش‌گیرانه را برای سامانه تولید چندمرحله‌ای موازی ارائه کرده‌اند. هدف از این پژوهش تعیین هم‌زمان طول دوره تولید، آستانه کنترل کیفیت و آستانه نت است؛ به‌طوری‌که میانگین نرخ هزینه کمترین مقدار ممکن شود. مدل ریاضی تصادفی توسعه‌یافته و با رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو و

[1] Tombe and Kulkarni
[2] Wan
[3] Duffuaa
[4] Pandey
[5] Gomes
[6] Lopes
[7] Cheng and Lee

الگوریتم ژنتیک حل شده‌است. در نهایت، یک مثال گویا و برخی مقایسه‌ها برای نشان دادن مدل ارائه شده‌است.

اکادی[1] و همکاران [۴۲] یک خط‌مشی یکپارچه برای کنترل بازرسی نمونه‌برداری، تولید و نت را برای سامانه‌های تولیدِ مستعدِ خرابی پیشنهاد کرده‌اند. برای بهینه‌سازی یکپارچه تولید، کیفیت و نت، یک مدل ریاضی جامع و کامل توسعه داده شده‌است. علاوه بر این، یک تحلیل حساسیت دقیق برای تأیید نتایج تحلیلی انجام شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که خط‌مشی یکپارچه پیشنهادی، مبتنی بر بازرسی پویا، بهتر از خط‌مشی‌های مبتنی بر راهبردهای بازرسی کلاسیک در نظر گرفته شده در ادبیات عمل می‌کند.

تأسیس[2] [۴۳] مدلی را پیشنهاد می‌کند که به‌طور مشترک جنبه‌های فرآیند مرتبطِ تولید، نت و کیفیت را در محیط‌های تولیدی نوین[3] بهینه می‌کند. خروجی فرآیند با ویژگی‌های کیفیِ مرتبط، بررسی می‌شود؛ در نهایت، بررسی عددی برای ارزیابی عملکرد ابزار پیشنهادی برای فرآیندهای معاصر انجام می‌شود.

بهشتی‌فاخر [۴۴] مدلی برای یکپارچه‌سازی تولید، نت و کیفیت برای بیشینه‌سازی سود را مطرح کرده‌است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بازرسی‌های غیر دوره‌ایِ همراه با انجام فعالیت‌های نت پیش‌گیرانه ممکن است منجر به بهبود سود کل شود.

بوسلاح[4] و همکاران [۴۵] مسئله یکپارچه تولید، نت پیش‌گیرانه و کنترل کیفیت را برای یک سامانه تولید تصادفی در نظر می‌گیرد. هدف اصلی در این پژوهش بهینه‌سازی یکپارچه اندازه مقیاس تولید، موجودی قابل‌اطمینان با به کمینه‌سازی کل هزینه‌ها می‌باشد. یک مدل ریاضی تصادفی توسعه داده و با استفاده از یک رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی حل شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که استفاده از نمونه‌برداری در چنین مسئله یکپارچه می‌تواند منجر به صرفه‌جویی بیش از ۲۰٪ هزینه‌ها گردد.

سلماس‌نیا و حافظیان [۴۶] مدلی یکپارچه در برنامه‌ریزی و مدیریت تولید در سامانه‌های چند محصولی ارائه کرده‌اند. مدل شبیه‌سازی به‌منظور تعیین بهینه متغیرهای تصمیم و کاهش هزینه مورد انتظار، تهیه و به‌وسیله الگوریتم ازدحام ذرات حل شده‌است؛ همچنین، یک تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج انجام گرفته‌است.

معنوی‌زاده و عزیزی‌جوان [۴۷] رویکردی جدید در بخشِ کنترل کیفیت فرایند ارائه کرده‌اند. در مدل‌های قبلی از نمودار کنترلx استفاده شده‌بود؛ اما در این پژوهش، به‌منظور بهبود در کیفیت فرآیند و افزایش دقت از نمودار کنترل جمع تجمعی استفاده شده‌است؛ که این امر موجب بهبود ۵٪ در تابع هدف نسبت به حالتی می‌شود که از نمودار کنترل x استفاده می‌شد.

جعفرزنجانی و همکاران [۴۸] با در نظر گرفتن عدم قطعیت سناریو-محور در تقاضا و نرخ خرابیِ تجهیزات، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی سناریو-محور (*RSSP*) استوار ارائه کرده‌اند. تابع هدف بیشینه‌کردن سود شبکه تولید چندکارخانه‌ای است. مدل پیشنهادی به‌صورت برنامه‌ریزی خطیِ مختلط است که در ابعاد کوچک با *CPLEX Solver* قابل‌حل می‌باشد؛ برای حل در ابعاد بزرگ نیز یک روش حل مبتنی بر تجزیه بندرز ارائه شده است.

همان‌طور که از پیشینه تحقیق مشخص است، تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با زمان‌بندی تولید در تمام محیط‌های تولیدی با در نظرگرفتن تلفیق زمان‌بندی تولید و زمان‌بندی نت انجام شده‌است؛ اما تلفیق مسئله زمان‌بندی نت و زمان‌بندی تولید چندهدفه با زمان‌های پردازش قابل‌کنترل و زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی با در نظرگیریِ بازرسی‌های کیفی بررسی نشده‌است. بنابراین، نیاز به یک روش و الگوی جدید برای مدلی که هر سه زمان‌بندی را با زمان‌های پردازش قابل‌کنترل و زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی به‌صورت توأم در نظر بگیرد محسوس است. با توجه به خلأ اشاره‌شده، این پژوهش در جستجوی ارائه روشی نو و کارا با ایجاد یکپارچگی بین سه زمان‌بندی در محیط موردنظر است.

[1] Ait-El-Cadi
[2] Tasias
[3] Modern
[4] Bouslah

۳- مدلسازی ریاضی

در این بخش ابتدا مشخصات مسئله مورد بررسی تشریح و در نهایت مدل ریاضی مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی نت پیش‌گیرانه و زمان‌بندی تولید با زمان‌های پردازش قابل‌کنترل و آماده‌سازی وابسته به‌توالی با لحاظ کردن بازرسی‌های کیفی ارائه می‌گردد. بدین منظور یک واحد تولیدی که برای تولید محصولات خود، به دنبال دو هدف اصلی می‌باشد در نظر گرفته‌شده‌است.: هدف نخست این‌که اختلاف بیشینه و کمینه تولید از هر محصول را در یک دوره تولید را به کم‌ترین مقدار برساند (برای ایجاد یک تولید یکنواخت) و هدف دوم این‌که کل هزینه‌های درگیر در جریان تولید اعم از هزینه راه‌اندازی، تولید محصول، کمبود، موجودی، بازرسی اقلام تولید شده و هزینه نت (نت پیش‌گیرانه و تعمیرات اساسی) است، را به کم‌ترین مقدار برساند.

با این توضیحات پارامترهای اساسی این تحقیق به این شرح است:

- تقاضای محصول n در دوره t
- زمان در دسترس در دوره t
- زمان فشرده پردازشِ محصول n
- زمان و هزینه آماده‌سازی محصول n، هنگام تولید در نخستین موقعیت کاری یا تولید بعد از محصول m
- هزینه کمبود و هزینه موجودی محصول n در دوره t
- هزینه ثابت و متغیر تولید محصول n در دوره t
- میزان آستانه برای نت پیش‌گیرانه و تعمیرات اساسی
- زمان و هزینه هر یک از فعالیت‌های نت پیش‌گیرانه و تعمیرات اساسی
- زمان و هزینه بازرسی اقلام تولیدی

در جستجوی یافتن مقادیر بهینه برای متغیرهای زیر است تا دو هدف بالا محقق شوند:

- محصول n در دوره t در اولین موقعیت پردازش شوند یا بعد از تولید محصول m (با فرض وجود زمان‌های پردازش وابسته به‌توالی)
- میزان تولید محصول n در دوره t
- میزان کمبود محصول n در دوره t
- میزان موجودی نگهداری شده محصول n در دوره t
- تعداد اقلام نامنطبق تولید شده از محصول n در دوره t
- انجام یا عدم انجام نت پیش‌گیرانه در دوره t
- انجام یا عدم انجام تعمیرات اساسی در دوره t

۳-۱- بیان مسئله و مفروضات

در این پژوهش، یک واحد تولیدی در برنامه‌ریزی تولید برای تولید مجموعه‌ای از محصولات در طول یک افق برنامه‌ریزی معین در نظر گرفته‌می‌شود. برای هر محصول، تقاضای معینی باید در پایان هر دوره برآورده شود.

ظرفیت موجودی سامانه تولیدی در هر دوره ثابت است. سفارشات و موجودی‌ها با هزینه‌های متفاوت در نظر گرفته می‌شود. عملیات راه‌اندازی در یک دوره، غیروابسته از عملیات در دوره قبلی است و هر زمان که راه‌اندازی انجام شود هزینه راه‌اندازی ثابت نیز تحمیل می‌شود. سامانه تولیدی پیشنهادی در معرض زوال است که منجر به افزایش نرخ شکست و نسبت فزاینده عیوب می‌شود. هنگام تولید محصولات مختلف، به دلیل ابزارها و سرعت‌های مختلف ماشین‌آلات، سیستم دچار آسیب‌های متفاوتی می‌شود که این شرایط عملیاتی، بر میزان شکست و میزان نقص تأثیرگذار است. نرخ خرابی دستگاه و نرخ نقص در هنگام تغییر شرایط عملیاتی دارای جهش‌های ناگهانی هستند.

هم قابلیت اطمینان و هم کاهش کیفیت وابسته به عملیات هستند. لازم به ذکر است که شکست در تولید خودبه‌خود اعلام می‌شوند؛ همچنین، تعمیر جزئی بی‌درنگ پس از وقوع یک شکست انجام می‌شود و بدون تغییر زمان استفاده، سامانه را به حالت "به همان بدی قدیمی" باز می‌گرداند. نت پیش‌گیرانه ناقص پس از هر دسته تولید انجام می‌شود که منجر به یک طرح نت پیش‌گیرانه می‌شود. بعد از هر نت پیش‌گیرانه وضعیت سامانه به وضعیت بهتری نسبت به قبل برمی‌گردد. پس از تولید هر دسته، یک بازرسی ۱۰۰٪ برای تشخیص محصولات نامنطبق انجام می‌شود.

تمام محصولات غیرمنطبق بی‌کاست اصلاح می‌شوند و تقاضا را همراه با محصولات منطبق در پایان هر دوره برآورده می‌کنند. فرض بر این است که بازرسی و اصلاح، ظرفیت تولید سامانه را اشغال نمی‌کنند؛ اما هزینه‌های مربوط در نظر گرفته‌می‌شود که به‌عنوان هزینه کیفیت محاسبه می‌شود. افت کیفیت با یک تعمیر اساسی- به‌محض تجاوز تعداد تجمعی محصولات نامطلوب (با احتساب وضعیت خوب ماشین) از مقدار معین- اصلاح می‌شود و سامانه به حالت "به‌خوبی جدید" بازیابی می‌شود.

هم نت پیش‌گیرانه و هم تعمیرات اساسی می‌توانند خرابی سامانه تولیدی را کاهش دهند. در این مسئله نیاز است تا به‌طور یکپارچه برنامه تولید بهینه، برنامه نت پیش‌گیرانه و خط‌مشیِ تعمیرات اساسی برای سامانه تولید دسته کوچک برای دست‌یابی نهایت کاهش ممکنِ کل هزینه تولید، موجودی، سفارش مجدد، تعمیر جزئی، نت پیش‌گیرانه، بازرسی، اصلاح و تعمیرات اساسی انجام گیرد.

سایر مفروضات اضافی به شرح زیر ارائه شده است:

- پیش از آغاز تولید، هیچ موجودی اولیه یا سفارش مجدد برای هیچ محصولی وجود ندارد؛ به عبارتی، سامانه تولیدی جدید است.
- هزینه‌ها و مدت‌زمان نت پیش‌گیرانه، تعمیرات اساسی و تعمیرات جزیی ثابت هستند.
- تعمیرات اساسی اولویت بیشتری نسبت به نت پیش‌گیرانه دارد. با توجه به اثربخشی آنها، به این معنی که نت پیش‌گیرانه و تعمیرات اساسی نمی‌توانند همزمان انجام شوند.
- ماشین‌آلات با زمان استفاده خراب می‌شود و با زمان استفاده، هم میزان خرابی و هم میزان نقص افزایش می‌یابد.
- شرایط عملیاتی در هنگام تولید محصولات مختلف متفاوت است و تأثیر آن بر نرخ نقص و نرخ شکست توسط مدل خطر متناسب[1] مدل‌سازی می‌شود.
- کیفیت محصول در نظر گرفته‌شده در این پژوهش تنها به عمر سامانه و شرایط عملیاتی مربوط می‌شود.

۳-۲- مدل ریاضی مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی نت پیش‌گیرانه و زمان‌بندی تولید با زمان‌های پردازش قابل‌کنترل و آماده‌سازی وابسته به‌توالی با لحاظ بازرسی‌های کیفی

در این بخش مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی نت پیش‌گیرانه و زمان‌بندی تولید با زمان‌های پردازش قابل‌کنترل و آماده‌سازی وابسته به‌توالی با وجود بازرسی‌های کیفی به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله شده‌است.

۳-۲-۱- اندیس‌ها

T تعداد دوره‌ها

N تعداد محصولات

t اندیس دوره

n اندیس محصول

[1] Proportional Hazard Model

۳-۲-۲- پارامترهای ورودی

AT_t زمان در دست در دوره t

pt''_n زمان فشرده برای پردازش محصول n

$st_{(n,\cdot)}$ زمان راه‌اندازی ماشین برای تولیدِ محصول n در موقعیت نخستین

$sc_{(n,\cdot)}$ هزینه راه‌اندازی ماشین برای تولید محصول n در موقعیت نخستین

CoI_n هزینه بازرسی برای هر واحد محصول n

TiI_n زمان بازرسی برای هر واحد محصول n

$d_{(n,t)}$ تقاضای محصول n در دوره t که باید برآورده شود

$st_{(n,m)}$ زمان راه‌اندازی ماشین برای تولید محصول n پس از تولید محصول m

$sc_{(n,m)}$ هزینه راه‌اندازی ماشین برای تولید محصول n پس از تولید محصول m

$r_{(n,t)}$ هزینه اصلاح محصول n در دوره t

$rt_{(n,t)}$ زمان اصلاح محصول n در دوره‌ی t

$shc_{(n,t)}$ هزینه کمبود محصول n در دوره t

$HC_{(n,t)}$ هزینه نگهداری محصول n در دوره‌ی t

$CS_{(n,t)}$ هزینه متغیر تولید محصول n در دوره‌ی t

$fc_{(n,t)}$ هزینه ثابت تولید محصول n در دوره t

$shc_{(n,t)}$ هزینه کمبود محصول n در دوره t

C_{PM} هزینه انجام نت پیش‌گیرانه

$C_{overhaul}$ هزینه انجام تعمیرات اساسی

T_{PM} زمان انجام نت پیش‌گیرانه

$T_{overhaul}$ زمان انجام تعمیرات اساسی

M آستانه تعمیرات اساسی

G آستانه نت پیش‌گیرانه

۳-۲-۳- متغیرهای تصمیم

pt_n زمان پردازشِ محصول n

$u_{(n,t)}$ مقدار محصول تولیدی در دوره t

u_n^{min} کمینه میزان تولید محصول n در تمامی دوره‌ها

u_n^{max} بیشینه میزان تولید محصول n در تمامی دوره‌ها

$B_{(n,t)}$ کمبود محصول n در دوره t

$I_{(n,t)}$ موجودی محصول n در دوره t

$q_{(n,t)}$تعداد اقلام نامنطبق تولیدی در دوره t

$Y_{(n,\cdot,t)}$ تولید یا عدم تولید محصول n در نخستین موقعیت در دوره t

$Y_{(n,m,t)}$ تولید یا عدم تولید محصول n بعد از محصول m در دوره‌ی t

هنگامی‌که تعداد تجمعی مورد انتظار اقلام ناسازگار در دوره t از آستانه تعمیرات اساسی M بیش‌تر شود، یک تعمیر اساسی برای رساندن سامانه به حالت نخستین انجام می‌شود.

تعمیرات اساسی در دوره t در غیر این‌صورت
$$o_t = \begin{cases} ۱ BL_t > M \\ BL_t \le M \end{cases}$$

نت پیش‌گیرانه دوره t در غیر این‌صورت
$$p_t = \begin{cases} ۱ BL_t > G \\ BL_t \le G \end{cases}$$

با درنظرگرفتن فرضیات، مشخصه‌ها و متغیرهای ذکرشده در بخش پیشین، مدل ریاضی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$min\ Z_۱ = \sum_{t=۱}^{T}(\sum_{n=۱}^{N} sc_{(n,\cdot)}Y_{(n,\cdot,\mathrm{t})} + \sum_{n\neq m} sc_{(n,m)}Y_{(n,m,t)}) + \sum_{t=۱}^{T}\sum_{n=۱}^{N}(fc_{(n,t)} + CS_{(n,t)}pt_n u_{(n,t)}) + \sum_{t=۱}^{T}\sum_{n=۱}^{N} shc_{(n,t)}B_{(n,t)} + \sum_{t=۱}^{T}\sum_{n=۱}^{N} HC_{(n,t)}I_{(n,t)} + \sum_{t=۱}^{T}\sum_{n=۱}^{N}(CoI_n u_{(n,t)} + r_{(n,t)}q_{(n,t)}) + \sum_{t=۱}^{T}\sum_{n=۱}^{N}(C_{PM}p_t + C_{overhaul}o_t)$$

$$min\ Z_۲ = \sum_{n=۱}^{N}(u_n^{max} - u_n^{min})$$

به‌طوری‌که:

$$\sum_{n=۱}^{N} sc_{(n,\cdot)}Y_{(n,\cdot,\mathrm{t})} + \sum_{n\neq m} sc_{(n,m)}Y_{(n,m,t)} + \sum_{n=۱}^{N} pt_n u_{(n,t)} + T_{PM}p_t + T_{overhaul}o_t + \sum_{n=۱}^{N}(TiI_n u_{(n,t)} + rt_{(n,t)}q_t) \le AT_t, \forall t \in T \quad (۱)$$

$$BL_t = \sum_{n=۱}^{N} q_{(n,t)}, \forall t \in T \quad (۲)$$

$$pt_n \ge pt_n'', \forall n \in N \quad (۳)$$

$$u_n^{min} \le u_{(n,t)} \le u_n^{max}, \forall t \in T \quad (۴)$$

$$u_{(n,t)} + I_{(n,t-۱)} \le d_{(n,t)} + B_{(n,t-۱)} + I_{(n,t)} - B_{(n,t)}$$
$$\forall t, n \in T, N$$

(۵)

$$p_t + o_t \leq ۱, \forall t \in T$$

(۶)

$$q_{(n,t)} \leq u_{(n,t)}$$

(۷)

$$\left|shc_{(n,T)}\right| = ۰$$

(۸)

$$Y_{(n\,.\,t)} + \sum_{\substack{m=۱ \\ m \neq n}}^{N} Y_{(n,m,t)} = ۱, \forall n, t \in N, T$$

(۹)

$$B_{(n,t)}, I_{(n,t)}, q_{(n,t)}, u_{(n,t)}, u_n^{min}, u_n^{max}, BL_t \in Z^+ \cup \{۰\}, \forall t, n \in T, N$$

(۱۰)

$$pt_n \geq ۰, \forall n \in N$$

(۱۱)

$$Y_{(n,\cdot,t)}, Y_{(n,m,t)}, p_t, o_t \in \{۰,۱\}, \forall t, n \in T, N$$

(۱۲)

تابع هدف اول با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌ها به ترتیب شامل هزینه راه‌اندازی، تولید محصول، نت (هزینه نت پیش‌گیرانه و تعمیرات اساسی)، هزینه بازرسی و کیفیت است. یافتن یک برنامه تولید یکنواخت (اختلاف بیش‌ترین تولید و کم‌ترین تولید به ازای هر محصول) مورد نظر تابع هدف دوم است.

در محدودیت (۱)، مجموع زمان‌های آماده‌سازی، تولید، نت (شامل نت پیشگیرانه و تعمیرات اساسی) و زمان‌های کیفیت (شامل زمان بازرسی و زمان اصلاح اقلام نامنطبق) کوچک‌تر از زمان دردسترس است.

محدودیت (۲) مجموع تعداد اقلام نامنطبق در آن دوره t را نشان می‌دهد.

محدودیت (۳) بیان می‌کند که زمان پردازش هر محصول نمی‌تواند از زمان فشرده آن در کم‌تر باشد.

محدودیت (۴) مشخص می‌کند که میزان تولید محصول n در دوره t می‌تواند بین بیشینه مقدار تولید و کمینه مقدار تولید نوسان داشته‌باشد.

محدودیت (۵) تعادل سامانه تولیدی را نشان می‌دهد.

محدودیت (۶) مشخص می‌کند که تعمیرات پیش‌گیرانه و اساسی نمی‌توانند درآن‌واحد انجام شوند.

محدودیت (۷) تضمین می‌کند که تعداد قطعات نامنطبق از میزان تولید آن تجاوز نمی‌کند.

محدودیت (۸) تضمین می‌کند که در انتهای آخرین دوره، برای هر محصول، کمبودی وجود نخواهد داشت.

محدودیت (۹) تضمین می‌کند که محصول n یا در موقعیت نخست تولید می‌شود یا بعد از محصول m.

محدودیت (۹) تضمین می‌کند که تعداد قطعات نامنطبق از میزان تولید آن تجاوز نمی‌کند.

محدودیت‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) به ترتیب متغیرهای عدد صحیح، مثبت و دودویی را نمایش می‌دهند.

۴- پیاده‌سازی

مطالعه موردی مربوط به مسئله مورد پژوهش، یک واحد تولید قطعات جلوبندی خودور است که برای تولید محصولات خود،

در جستجوی دو هدف اصلی زیر می‌باشد:

هدف نخست این‌که اختلاف بیشینه و کمینه تولید از هر محصول را در یک دوره تولید به کم‌ترین مقدار ممکن برسد (برای ایجاد یک تولید یکنواخت) و هدف دوم کل هزینه‌های درگیر در جریان و فرایند تولید اعم از هزینه‌های راه‌اندازی، تولید محصول، کمبود، نگهداری موجودی، بازرسی اقلام تولید شده و هزینه نت (هزینه نت پیش‌گیرانه و تعمیرات اساسی) است، را تا حد امکان کاهش می‌دهد.

مدل پیشنهادی در نرم‌افزار گمز ۲۴.۱.۲ بر روی رایانه[1]برنامه‌نویسی و حل شد. برای کد نویسی از روش حل فازی مدل چند هدفه استفاده شده‌است. جدول ۱ تا ۲۰ نتایج محاسباتی و فضای شدنی را برای مدل بررسی می‌نماید.

جدول ۱ تعداد محصولات و دوره‌ها

N	۵
T	۳

جدول ۲ زمان بازرسی هر محصول

n	۱	۲	۳	۴	۵
$\mathrm{TiI_n}$	۴	۱۳	۱۳	۷	۱۵

جدول ۳ هزینه بازرسی هر محصول

n	۱	۲	۳	۴	۵
$\mathrm{CoI_n}$	۳	۱۵	۴	۲	۹

جدول ۴ زمان فشرده تولید هر محصول

n	۱	۲	۳	۴	۵
pt''_n	۵	۸	۸	۶	۶

جدول ۵ زمان در دسترس در هر دوره

n	۱	۲	۳
$\mathrm{AT_t}$	۱۳۲	۱۳۲	۱۳۲

جدول ۶ زمان آماده‌سازی ماشین برای تولید هر محصول در موقعیت نخستین

n	۱	۲	۳	۴	۵
$\mathrm{st_{(n,0)}}$	۶	۲	۳	۱۰	۷

جدول ۷ هزینه آماده‌سازی ماشین برای تولید هر محصول در موقعیت نخستین

n	۱	۲	۳	۴	۵
$st_{(n,0)}$	۶۸	۱۵	۱۵	۱۲	۶

جدول ۸ زمان اصلاح هر محصول در هر دوره

t/n	۱	۲	۳
۱	۴	۴	۲
۲	۱۰	۷	۷
۳	۱	۵	۱۰
۴	۲	۳	۱
۵	۶	۸	۴

[1] 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H 2.30 GHz-ASUS laptop

جدول ۹ هزینه اصلاح هر محصول در هر دوره

t/n	۱	۲	۳
۱	۵	۵	۹
۲	۴	۶	۲
۳	۵	۲	۸
۴	۴	۳	۱
۵	۴	۶	۶

جدول ۱۰ تقاضای هر محصول در هر دوره

t/n	۱	۲	۳
۱	۵۱	۶۱	۹۷
۲	۶۴	۸۰	۹۵
۳	۹۳	۹۶	۹۵
۴	۹۸	۷۴	۸۴
۵	۶۸	۶۲	۷۸

جدول ۱۱ زمان آماده‌سازی محصول *n* بعد از محصول *m*

	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۱۰	۲	۷	۹	۹
۲	۷	۱	۱۴	۱۱	۱۲
۳	۱۰	۸	۱۰	۹	۱
۴	۷	۴	۱۰	۸	۴
۵	۲	۳	۵	۱۰	۱۲

جدول ۱۲ هزینه آماده‌سازی محصول *n* بعد از محصول *m*

	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۱۵	۱۲	۲	۱۳	۲
۲	۱۵	۱	۲	۹	۱۲
۳	۱۲	۹	۶	۹	۱۳
۴	۶	۱۲	۱۰	۱۲	۶
۵	۸	۱۵	۱۱	۷	۷

جدول ۱۳ هزینه کمبود هر محصول در هر دوره

	۱	۲	۳
۱	۲	۱۰	۸
۲	۲	۱	۱
۳	۸	۸	۵
۴	۵	۲	۶
۵	۸	۵	۵

جدول ۱۴ هزینه کمبود هر محصول در هر دوره

	۱	۲	۳
۱	۱۵	۱۱	۱۱
۲	۱۸	۱۹	۱۸
۳	۱۰	۱۲	۱۱
۴	۱۰	۱۶	۱۷
۵	۱۵	۱۷	۱۷

جدول ۱۵ هزینه نگه‌داری هر محصول در هر دوره

	۱	۲	۳
ا	۷۱	۶۵	۷۷
۲	۶۰	۷۰	۹۴
۳	۵۹	۷۲	۷۷
۴	۹۸	۷۵	۶۳
۵	۷۱	۸۷	۹۴

جدول ۱۶ زمان و هزینه تعمیرات اساسی

$T_{overhaul}$	۸
$C_{overhaul}$	۱۴

جدول ۱۷ زمان و هزینه تعمیرات پیش‌گیرانه

T_{pm}	۳
C_{pm}	۱۰

جدول ۱۸ هزینه ثابت هر محصول در هر دوره

	۱	۲	۳
ا	۱۰۲	۱۲۶	۱۴۱
۲	۱۴۹	۱۸۳	۱۳۷
۳	۱۴۲	۱۰۰	۱۱۱
۴	۱۱۹	۱۲۱	۱۱۰
۵	۱۳۴	۱۶۶	۱۱۲

جدول ۱۹ هزینه متغیر هر محصول در هر دوره

	۱	۲	۳
۱	۱۰	۷	۷
۲	۱۱	۱۳	۴
۳	۱۵	۱۴	۱۳
۴	۸	۵	۱
۵	۵	۶	۱۳

مقدار به‌دست‌آمده برای هر متغیر تصمیم و تابع هدف به‌صورت زیر می‌باشد:

جدول ۲۰ زمان پردازشِ هر محصول

n	۱	۲	۳	۴	۵
pt_n	۵	۸	۸	۶	۶

جدول ۲۱ نت پیش‌گیرانه در دوره t

	۱	۲	۳
p_t	۱	۱	۱

جدول ۲۲ تعمیرات اساسی در هر دوره

	۱	۲	۳
o_t	۰	۰	۰

جدول ۲۳ تولید یا عدم تولید هر محصول در موقعیت نخستین

n/t	۱	۲	۳
۲	۱	۱	۰
۳	۱	۱	۰
۵	۰	۱	۱

زمان پردازشِ هر محصول، وجود نت پیش‌گیرانه و عدم وجود تعمیرات اساسی برای هر سه دوره مطابق جدول ۲۰، جدول ۲۱و جدول به‌دست‌آمده است. جدول ۲۳ نشان می‌دهد که در دوره اول محصولات ۲ و ۳ و در دوره دوم نیز محصولات ۲، ۳ و ۵ در موقعیت نخست تولید می‌شوند. در آخرین دوره تنها محصول ۵ در ابتدا تولید می‌شود.

جدول ۲۴ تولید یا عدم تولیدِ هر محصول بعد از دیگری در هر دوره

	۱	۲	۳
۱.۳	۰	۰	۱
۱.۵	۱	۱	۰
۲.۳	۰	۰	۱
۴.۱	۱	۱	۱
۵.۴	۱	۰	۰

جدول فوق نشان می‌دهد که ترتیب پردازش هر محصول در هر دوره به چه صورت است. به‌عنوان‌مثال، در نخستین دوره محصول ۵ بعد از محصول ۱ و محصول ۱ بعد از محصول ۴ می‌تواند تولید شود.

جدول ۲۵ تعداد اقلام نامنطبقِ هر دوره برای هر محصول

	۱	۲	۳
۱	۷	۷	۸
۲	۰	۰	۰
۳	۱	۰	۰
۴	۰	۱	۰
۵	۰	۰	۰

جدول ۲۶ تعداد اقلام نامنطبقِ هر دوره

۱	۲	۳
۸	۸	۸

جدول ۲۷ تعداد اقلام تولیدی برای هر محصول در هر دوره

	۱	۲	۳
۱	۸	۷	۸
۲	۱	۱	۱
۳	۱	۱	۱
۴	۱	۱	۱
۵	۱	۱	۱

جدول‌های ۲۵، ۲۶ و ۲۷ به ترتیب تعداد اقلام نامنطبق در هر دوره برای هر محصول، تعداد اقلام نامنطبق در هر دوره تعداد و اقلامِ تولیدی برای هر محصول در هر دوره را نشان می‌دهد.

جدول ۲۹ کمینه اقلامِ تولیدی هر محصول در تمامی دوره‌ها

	۱	۲	۳	۴	۵
u_{min}	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۳۰ بیشینه اقلام تولیدی هر محصول در تمامی دوره‌ها

	۱	۲	۳	۴	۵
u_{max}	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

مقادیر به‌دست‌آمده برای کمینه و بیشینه اقلامِ تولیدی هر محصول در تمامی دوره‌ها در جدول ۲۹ و ۳۰ ارائه شده‌است.

۵- نتایج تحقیق

در این پژوهش، مدلی یکپارچه برای زمان‌بندی تولید، برنامه‌ریزی نگهداری–تعمیرات (نت) و بازرسی اقلام تولیدی ارائه گردید که هدف آن کمینه‌سازی هزینه‌های کل تولید در کنار دستیابی به تولیدی یکنواخت و باکیفیت است. در مدل پیشنهادی، عوامل مؤثر نظیر زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی، زمان‌های پردازش قابل‌کنترل و هزینه‌های مرتبط با انواع فعالیت‌های نت (پیش‌گیرانه و اساسی)، کمبود، موجودی و بازرسی کیفی به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده‌اند تا تصمیمات حاصل، واقع‌بینانه‌تر و کارآمدتر باشند.

نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل در مطالعه موردی صنعت خودروسازی نشان داد که یکپارچه‌سازی تصمیمات تولید، نت و کنترل کیفیت موجب کاهش قابل‌توجه هزینه‌های عملیاتی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم تولید می‌شود. همچنین مشخص گردید که میان حجم تولید هر محصول و میزان اقلام نامنطبق رابطه‌ای مستقیم وجود دارد؛ به‌عبارت‌دیگر، افزایش نرخ تولید بدون در نظر گرفتن ظرفیت و شرایط نگهداری تجهیزات می‌تواند منجر به افت کیفیت گردد. از سوی دیگر، نت پیش‌گیرانه نسبت به تعمیرات اساسی هزینه کمتری داشته و اجرای منظم آن می‌تواند از وقوع خرابی‌های شدید و توقف‌های پرهزینه جلوگیری نماید.

بنابراین، به‌کارگیری مدل تلفیقی ارائه‌شده در محیط‌های تولیدی، نه‌تنها باعث بهبود کیفیت و یکنواختی تولید می‌شود، بلکه با کاهش هزینه‌های نت و بازرسی، بهره‌وری کل سیستم را افزایش می‌دهد. توصیه می‌شود مدیران تولید با تکیه‌بر نتایج این تحقیق، رویکرد یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید و نگهداری–تعمیرات را در دستور کار قرار دهند تا ضمن کنترل بهتر کیفیت محصول، از بروز فرسودگی و توقف‌های غیرمنتظره در خطوط تولید جلوگیری شود.

با مقایسه جداول ۲۱ و ۲۲ مشخص می‌گردد، این سیستم یکپارچه در ۳ دوره متوالی به یک سیستم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نیاز دارد و نت اضطراری هزینه بیشتری به سیستم وارد می‌سازد.

لذا به استناد مطالعات پیشین که در بخش دوم این تحقیق ارائه گردید، جهت ارتقای بهره‌وری و کاهش تداخل برنامه‌ریزی مورد توجه قرار گرفته است. لذا در بخش سوم این تحقیق مدل مربوطه ارائه گردید. در بخش چهارم این تحقیق مدل ارائه شده در یک مطالعه موردی مرتبط با صنعت خودروسازی پیاده‌سازی گردید. نتایج حاصل را می‌توان در قالب پیشنهادات مدیریتی زیر ارائه نمود:

۱-تعداد اقلام نامنطبق هر دوره برای هر محصول در دوره‌های مختلف متأثر از زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات محصولات است. به طوریکه مدیر تولید باید در برنامه‌ریزی تولید این محصولات با توجه به زمان‌های قابل‌پردازش توجه داشته باشد.

۲- رابطه کاملاً مستقیمی بین حجم اقلام تولیدی برای هر محصول در هر دوره با تعداد اقلام نامنطبق هر دوره وجود دارد. برای محصولات با حجم بالای تولید، اقلام نامنطبق تولید خواهد شد. لذا باید برای اصلاح و بازیابی این محصولات توجه خاصی صورت گیرد.

۳- برنامه‌ریزی برای نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه هزینه کمتری نسبت به تعمیرات اساسی دارد لذا در مطالعه موردی استفاده‌شده مشخص شد می‌توان با نگهداری تعمیرات پیش‌گیرانه مانع از تعمیرات اساسی شد.

۶- منابع

[1] Monma CL, Potts CN. Analysis of heuristics for preemptive parallel machine scheduling with batch setup times. Operations Research. 1993;41(5):981–993.

[2] Karimi-Nasab M, Modarres M, Seyedhoseini SM. A self-adaptive PSO for joint lot sizing and job shop scheduling with compressible process times. Applied Soft Computing. 2015;27:137–147.

[3] Wang JB, Xia ZQ. Single machine scheduling problems with controllable processing times and total absolute differences penalties. European Journal of Operational Research. 2007;177(1):638–645.

[4] Kayvanfar V, Komaki GM, Aalaei A, Zandieh M. Minimizing total tardiness and earliness on unrelated parallel machines with controllable processing times. Computers & Operations Research. 2014;41:31–43.

[5] Hsieh PH, Yang SJ, Yang DL. Decision support for unrelated parallel machine scheduling with discrete controllable processing times. Applied Soft Computing. 2015;30:475–483.

[6] Karimi-Nasab M, Aryanezhad MB. A multi-objective production-smoothing model with compressible operating times. Applied Mathematical Modelling. 2011;35(7):3596–3610.

[7] Karimi-Nasab M, Ghomi SF. Multi-objective production scheduling with controllable processing times and sequence-dependent setups for deteriorating items. International Journal of Production Research. 2012;50(24):7378–7400.

[8] Yin Y, Wu WH, Cheng TCE, Wu CC. Single-machine scheduling with time-dependent and position-dependent deteriorating jobs. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2015;28(7):781–790.

[9] Naderi B, Zandieh M, Fatemi Ghomi SMT. A study on integrating sequence dependent setup time flexible flow lines and preventive maintenance scheduling. Journal of Intelligent Manufacturing. 2009;20(6):683–694.

[10] Sortrakul N, Nachtmann HL, Cassady CR. Genetic algorithms for integrated preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine. Computers in Industry. 2005;56:161–168.

[11] Chen JS. Scheduling of nonresumable jobs and flexible maintenance activities on a single machine to minimize makespan. European Journal of Operational Research. 2008;190(1):90–102.

[12] Pan E, Wang G, Xi L, Chen L, Han X. Single-machine group scheduling problem considering learning, forgetting effects and preventive maintenance. International Journal of Production Research. 2014;52:5690–5704.

[13] Mellouli R, Sadfi C, Chu C, Kacem I. Identical parallel machine scheduling under availability constraints to minimize the sum of completion times. European Journal of Operational Research. 2008;197:1150–1165.

[14] Motaghedi-Larijani A, Haddad R, Sabri-Laghaie K. A new single-machine scheduling problem with setup time, job deterioration and maintenance costs. International Journal of Management Science and Engineering Management. 2011;6:284–291.

[15] Wang S. Bi-objective optimization for integrated scheduling of single machine with setup times and preventive maintenance planning. International Journal of Production Research. 2013;51:3719–3733.

[16] Wong CS, Chan FTS, Chung SH. A joint production scheduling approach considering multiple resources and preventive maintenance tasks. International Journal of Production Research. 2013;51:883–896.

[17] Lee WC. A note on single-machine make-span scheduling with deteriorating jobs and scheduled maintenance. Journal of Information and Optimization Sciences. 2007;28:469–477.

[18] Pan E, Liao W, Xi L. Single-machine-based production scheduling model integrated preventive maintenance planning. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;50:365–375.

[19] Rastgar A, Rezaeian J, Fattahi P. Integrated modeling of production planning and maintenance scheduling in hybrid job-shop environment. Pajouhesh-haye Novin dar Tasmim-giri. 1401;2:1–27. [In Persian].

[20] Hosseini M. Integrated modeling and solution of production planning and maintenance scheduling in a bi-objective framework considering customer dissatisfaction. Motaleat Modiriat Sanati. 1399;56:129–169. [In Persian].

[21] Rezaeian J, Razaghi A. Two-stage flow shop assembly line scheduling considering job aging effect, job availability constraints and preventive maintenance. Mohandesi Sanaye. 1397;1:49–60. [In Persian].

[22] Haji-Pour V, Mousavi M. Integrated production and maintenance optimization considering carbon emission. Mohandesi Sanaye va Modiriat Sharif. 1399;2(1):25–36. [In Persian].

[23] Mishra K, Shrivastava A, D. Integration of production scheduling and group maintenance planning in multi-unit system employing TLBO algorithm. Procedia CIRP. 2020;93:949–954.

[24] Yang H, Li W, Wang B. Joint optimization of preventive maintenance and production scheduling for multi-state production systems based on reinforcement learning. Reliability Engineering & System Safety. 2021;214:107713.

[25] Merghem M, Haoues M, Mouss K, Dahane M, Senoussi A. Integrated production and maintenance planning in hybrid manufacturing-remanufacturing system with outsourcing opportunities. Procedia Computer Science. 2023;217:1487–1496.

[26] Chekoubi Z, Ettahiry N, Dellagi S, Trabelsi W, Majdouline I. Integrated production and maintenance scheduling with environmental and operational considerations. IFAC-PapersOnLine. 2022;55:1369–1374.

[27] Sinisterra WQ, Cavalcante CAV. An integrated model of production scheduling and inspection planning for resumable jobs. International Journal of Production Economics. 2020;227:31–37.

[28] Salahi F, Daneshvar A, Homayounfar M, Pourghader-Chobar A. Presenting an integrated model for production planning and preventive maintenance scheduling considering uncertainty of parameters and disruption of facilities. Industrial Management Perspective. 2023;13(1):105–140.

[29] Lv X, Shi L, He Y, He Z. Joint optimization of production, inspection, and maintenance under finite time for smart manufacturing systems. Reliability Engineering & System Safety. 2025;253:110490.

[30] Wang Y, Xia T, Xu Y, Si G, Wang D, Pan E, Xi L. Quality-centered production and maintenance optimization for advanced manufacturing systems under uncertainty. Reliability Engineering & System Safety. 2024;245:110025.

[31] Lv X, Shi L, He Y, He Z. Joint optimization of production, inspection, and maintenance under finite time for smart manufacturing systems. Reliability Engineering & System Safety. 2025;253:110490.

[32] Joyaardakani H, Khakzar-Bafrouyi M. Economic design of integrated maintenance control and management chart in Kish Wood Industries. Pajouhesh-haye Novin dar Tasmim-giri. 1401;1:116–132. [In Persian].

[33] Rasaei H, Fallah-Nejad MS, Zare-Mehrjardi Y. Integration of maintenance decisions and process control in a serial production system. Majale-ye Irani Motaleat Modiriat. 1395;2:379–405. [In Persian].

[34] Tambe P, Kulkarni M. A reliability based integrated model of maintenance planning with quality control and production decision for improving operational performance. Reliability Engineering & System Safety. 2022;226:108681.

[35] Wan Q, Chen L, Zhu M. A reliability-oriented integration model of production control, adaptive quality control policy and maintenance planning for continuous flow processes. Computers & Industrial Engineering. 2022;176:108985.

[36] Duffuaa S, Kolus A, Al-Turki U, El-Khalifa A. An integrated model of production scheduling, maintenance and quality for a single machine. Computers & Industrial Engineering. 2020;142:106239.

[37] Pandey D, Kulkarni M, Vrat P. A methodology for joint optimization for maintenance planning, process quality and production scheduling. Computers & Industrial Engineering. 2011;61:1098–1106.

[38] Hadian SM, Farughi H, Rasay H. Joint planning of maintenance, buffer stock and quality control for unreliable, imperfect manufacturing systems. Computers & Industrial Engineering. 2021;157:107304.

[39] Rivera-Gómez H, Gharbi A, Kenné JP, Ortiz-Zarco R, Corona-Armenta JR. Joint production, inspection and maintenance control policies for deteriorating system under quality constraint. Journal of Manufacturing Systems. 2021;60:585–607.

[40] Lopes R. Integrated model of quality inspection, preventive maintenance and buffer stock in an imperfect production system. Computers & Industrial Engineering. 2018;126:650–656.

[41] Cheng G, Li L. Joint optimization of production, quality control and maintenance for serial-parallel multistage production systems. Reliability Engineering & System Safety. 2020;204:107146.

[42] Ait-El-Cadi A, Gharbi A, Dhouib K, Artiba A. Integrated production, maintenance and quality control policy for unreliable manufacturing systems under dynamic inspection. International Journal of Production Economics. 2021;236:108140.

[43] Tasias AK. Integrated quality, maintenance and production model for multivariate processes: a Bayesian approach. Journal of Manufacturing Systems. 2022;63:35–51.

[44] Beheshti-Fakher H, Nourelfath M, Gendreau M. Integrating production, maintenance and quality: A multi-period multi-product profit-maximization model. Reliability Engineering & System Safety. 2018;170:236–248.

[45] Bouslah B, Gharbi A, Pellerin R. Integrated production, sampling quality control and maintenance of deteriorating production systems with AOQL constraint. Omega. 2016;61:110–126.

[46] Salmasnia A, Hafeziyan R. Integrated optimization model of production planning, quality control and maintenance for multi-product systems. In: 2nd International Conference on Modern Developments in Management, Economics and Accounting. 1397. [In Persian].

[47] Ma'navi-Zadeh N, Azizi-Javan A. A new approach in joint optimization of maintenance, process quality and production planning. In: 10th International Conference on Industrial Engineering. 1392. [In Persian].

[48] Jafarzanjani H, Zandieh M, Khalilzadeh M. Stochastic programming model and Benders decomposition approach for integrated production and maintenance planning in multi-factory production systems. Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems. 1399; 16:77–93. [In Persian].